



Red inalámbrica de sensores con topología lineal sin capa de red

Wireless sensor network with linear topology without network layer

Carlos Egas Acosta

Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador
carlos.egas@epn.edu.ec
ORCID: 0002-3540-9768

Felipe Gil-Castiñeira

Universidad de Vigo, Vigo, España
xil@gti.uvigo.es
ORCID: 0002-5164-0855

Enrique Costa-Montenegro

Universidad de Vigo, Vigo, España
kike@gti.uvigo.es
ORCID: 0002-4674-1897

doi: <https://doi.org/10.36825/RITI.09.17.006>

Recibido: Octubre 23, 2020

Aceptado: Enero 16, 2020

Resumen: Un caso particular de redes inalámbricas de sensores son aquellas que tienen una topología lineal. Estas redes son utilizadas en el monitoreo de infraestructuras lineales a gran escala que se caracterizan por tener miles de nodos sensores, cientos de saltos y grandes longitudes. Los requisitos para realizar el enrutamiento en topologías lineales son mínimos en relación a los requerimientos de otras topologías. Existen en la actualidad varias arquitecturas de red y protocolos de enrutamiento para las redes inalámbricas de sensores, las cuales se han creado en función de la aplicación que se ejecutará en los nodos. Los protocolos de enrutamiento diseñados para topología tipo malla, árbol y estrella son muy complejos si se les aplica a topologías lineales multisalto dando como resultado grandes retardos por procesamiento. En este artículo se define la pertinencia de la existencia del nivel de red en la arquitectura de la red con topología lineal para lo cual se analiza las funciones de los protocolos de red que son aplicables a las topologías lineales. Finalmente, se justifica que el nivel de red no es necesario en redes inalámbricas de sensores con topología lineal, y como consecuencia se propone los niveles de red que debe tener la nueva arquitectura de red.

Palabras clave: Topología, Lineal, Red, Sensores, Inalámbrica.

Abstract: A particular case of wireless sensor networks are those that have a linear topology. These networks are used in monitoring large-scale linear infrastructures that are characterized by having thousands of sensor nodes, hundreds of hops and great lengths. The requirements for routing in linear topologies are minimal relative to the requirements of other topologies. There are currently several network architectures and routing protocols for

wireless sensor networks, which have been created based on the application that will run on the nodes. Routing protocols designed for mesh, tree, and star topologies are very complex when applied to linear multi-hop topologies, resulting in large processing delays. This article defines the relevance of the existence of the network level in the network architecture with linear topology, for which the functions of the network protocols that are applicable to linear topologies are analyzed. Finally, it is justified that the network level is not necessary in wireless sensor networks with linear topology, and as a consequence, the network levels that the new network architecture should have are proposed.

Keywords: *Topology, Linear, Network, Sensors, Wireless.*

1. Introducción

Las redes inalámbricas de sensores que utilizan el estándar IEEE 802.15.4 [1], han recibido mucha atención debido a su constante desarrollo en el campo de las redes de datos por su bajo costo de implementación y operación, por otra parte, los tiempos de operación de los nodos cada vez largos, las hacen ideales para su uso en una gran cantidad de aplicaciones como son monitoreo de tuberías [2], oleoductos [3], fronteras [4], tráfico [5], incendios forestales [6], trenes [7] y de futuras aplicaciones en infraestructuras lineales gran escala.

En las redes de sensores inalámbricos, el protocolo estándar para el nivel de enlace y la capa física es IEEE 802.15.4. Los protocolos WirelessHART e ISA100.11^a [8] utilizan este estándar para la capa física y los protocolos Zigbee [9], 6Lowpan [10] usan para la capa física y de enlace¹ como se muestra en la Figura 1.

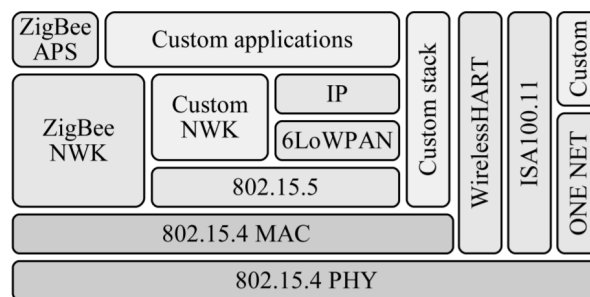


Figura 1. Protocolos para redes inalámbricas de sensores [11].

Un tipo particular de redes inalámbricas de sensores, son las forman una topología lineal Figura 2, que se extienden sobre infraestructuras lineales con longitudes relativamente largas, redes que se ven afectadas por los retardos de extremo a extremo debido a la longitud de las infraestructuras y por el consumo de energía de los nodos que tienen que retransmitir las tramas de otros nodos para que puedan alcanzar el nodo frontera. Este tipo de redes multisalto se caracteriza por el pequeño número de nodos que están dentro de la zona de cobertura de un nodo sensor, por los miles de nodos que conforman la red y por el gran número de nodos retransmisores por el cual tiene que pasar el mensaje para que llegue al Colector de Datos. Los nodos frontera se comunican con el Colector de Datos y utilizan tecnologías de comunicación de largo alcance.

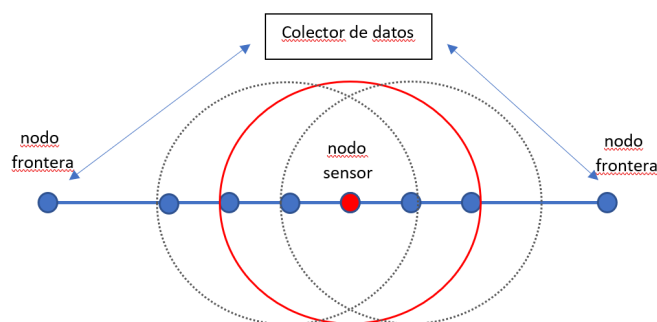


Figura 2. Topología Lineal.

Para un buen funcionamiento de las redes inalámbricas de sensores en infraestructuras lineales con cientos de nodos, se necesitan nuevos marcos de desarrollo y protocolos que deben tomar ventaja de la topología lineal con el propósito de aumentar la eficiencia del enrutamiento, mejorar la confiabilidad y seguridad [12].

De manera particular, los protocolos de enrutamiento que no son óptimos tienen como efecto disminuir el tiempo de operación de los nodos y por lo tanto de la red, debido a un mayor consumo de energía que se requiere para determinar la topología de la red y encontrar la mejor ruta.

El protocolo de enrutamiento en una red inalámbrica de sensores, compuesta por nodos que tienen limitaciones de cálculo y operan con baterías, es garantizar la fiabilidad de la red, lograr una eficiencia energética, adaptarse a las características propias de la red, considerar un equilibrio entre fiabilidad y consumo energético, y en base a las características de la aplicación, proporcionar capacidad a la red para ser extensible y proporcionar calidad de servicio.

Los protocolos de enrutamiento deben acoplarse a las aplicaciones para proporcionar escalabilidad a la red, proporcionar la capacidad para funcionar adecuadamente a medida que crece y ajustarse a las demandas de las aplicaciones.

La calidad de servicio que debe ofrecer la red depende de los requerimientos de la aplicación y por lo general tienen como objetivo optimizar el retardo, ancho de banda disponible y minimizar la pérdida de paquetes.

Adicionalmente, se debe tener muy en cuenta que los protocolos de enrutamiento existentes para WSN emplean diferentes estrategias las cuales consideran que los nodos deben configurarse de manera autoorganizada debido a la gran cantidad de nodos que deben ser configurados, además de que fueron diseñados para operar en topologías tipo árbol, malla y estrella. Sin embargo, estas estrategias cambian el momento que se trata de diseñar un protocolo de enrutamiento para una red inalámbrica de sensores con topología lineal.

Todas estas características son factores de diseño básicos de los protocolos de enrutamiento que deben considerarse para garantizar eficiencia de la red. La eficiencia del protocolo de enrutamiento está altamente influenciada por la ubicación del nodo en la infraestructura lineal y por las características del tráfico que influye en el retardo por procesamiento en el nodo debido al tiempo necesario para realizar el enrutamiento en el caso de nodos no operativos y enlaces ruidosos.

La mayoría de las aplicaciones relacionadas con infraestructuras lineales a gran escala, tienen relación con el monitoreo de fronteras, oleoductos, carreteras, asociados con tráfico transaccional de baja velocidad, las retransmisiones de los nodos intermedios es un factor importante a ser considerado ya que influye en el consumo de energía y en el retardo total, este tema es un desafío en el diseño de protocolos de enrutamiento para estas redes. La información de un nodo sensor tienen que pasar por uno de los dos nodos frontera ubicados en los extremos de la infraestructura lineal, en los nodos internos que están muy próximos a los nodos frontera la eficiencia energética es un tema crítico.

El propósito del trabajo es presentar las evidencias para evidenciar que la mayoría de los procesos que son responsabilidad del nivel de red no son aplicables a redes inalámbricas de sensores con topología lineal y de esta manera sustentar la necesidad de realizar investigación con el objetivo de crear una arquitectura de referencia para redes inalámbricas de sensores con topología lineal aplicado a infraestructuras lineales a gran escala con miles de nodos que operan con el estándar IEEE 802.15.4, y concluir que las arquitecturas actuales no satisfacen de manera adecuada los requerimientos de este tipo de red multisalto.

El documento está organizado de la siguiente manera: la Sección 2 analiza el estado del arte; la Sección 3 analiza las funciones del nivel de red; la Sección 4 presenta la propuesta. Finalizamos el artículo en la Sección 5 con las conclusiones.

2. Estado del arte

En la actualidad, persisten los desafíos para realizar el enrutamiento para redes inalámbricas de sensores en infraestructuras lineales, relacionados con el ahorro del consumo de energía de los nodos, facilidad para el despliegue de nodos, escalabilidad, conectividad, cobertura y seguridad [13].

En [14] presentamos un análisis de los protocolos existentes aplicables a las redes inalámbricas de sensores lineales, se definen las características de este tipo de redes y se discute como los protocolos que se utilizan en la actualidad en redes inalámbricas de sensores, pueden satisfacer los requisitos de redes con topología lineal, en el presente artículo realizamos un análisis más detallado de la pertinencia o no de la capa de red en este tipo de redes.

Las características particulares de las redes inalámbricas de sensores con topología lineal crean la necesidad de desarrollar nuevos algoritmos de enrutamiento que consideren las características de una topología lineal teniendo en cuenta que en redes inalámbricas de sensores no está definida una arquitectura de red única [15]. Ni los protocolos existentes ni las arquitecturas existentes consideran los requisitos particulares de este tipo de redes para optimizar los procesos que se llevan a cabo a nivel de aplicación, transporte y red.

Desde que se empezó a definir estándares para las redes inalámbricas de sensores, ya existió el debate sobre la pertinencia de que en el diseño de la arquitectura para una red inalámbricas de sensores se debe replicar la estructura en capas de Internet o si se debería tener un diseño más flexible [16] para que se adapte a las características de los nodos que tienen bajas capacidades de cálculo, trabajan con baterías y a las aplicaciones que requieren las redes sensores y actuadoras. Este debate toma importancia debido a la necesidad de monitorear infraestructuras lineales a gran escala que se caracterizan por tener una topología lineal, una única ruta física, el número de nodos dentro de la zona de cobertura de un nodo sensor es mínimo y el número de aplicaciones a ejecutarse en el nodo es limitado.

En [17] los autores, discuten si el enrutamiento en las redes inalámbricas de sensores se debe implementar en la capa de red o en la capa de enlace, considerando las diversas arquitecturas que en la actualidad se tiene para las redes inalámbricas de sensores. Con estos antecedentes, sustentamos que, en una topología lineal, al existir una sola ruta física, los procesos de enrutamiento que se deben realizar son mínimos y las funciones que se necesitan implementar a nivel de red para minimizar los efectos de nodos dañados y enlaces ruidosos, podrían formar parte de otras capas, específicamente del nivel de enlace.

3. Funciones del Nivel de Red

A continuación, se presentan y se analizan las funciones típicas del nivel de red que se requieren en topologías malla, estrella y árbol, y su relación en una red con topología lineal.

La capa de red se encarga de llevar los paquetes, desde el origen hasta el destino, para lo cual utiliza los nodos intermedios en topologías que disponen de múltiples rutas entre el nodo fuente y el nodo destino. Para lograr sus objetivos, la capa de red debe conocer la topología de la red y elegir la ruta más apropiada para que los paquetes lleguen a su destino. La selección de la mejor ruta considera el camino más corto, la menos congestionada, que proporcione el menor retardo, que permita transmitir de manera más rápida la información y que económicamente sea la más conveniente. Cuando en la ruta entre el origen y el destino existen nodos fallidos o enlaces fallidos la capa de red es la encargada de solucionar este problema mediante la búsqueda de nuevas rutas. Para realizar todas estas acciones, es necesario que los nodos tengan identificadores únicos, conocidos como las direcciones de red.

3.1. Direccionamiento

El nivel de red para cumplir con sus objetivos, necesita que cada nodo tenga su identificador global, en el caso de la red Internet, los identificadores están relacionados con las direcciones IP las cuales pueden ser asignadas de forma manual y automática. El protocolo IEEE 802.15.4 en el campo de direccionamiento utiliza un identificador para la red de área personal y un identificador para el nodo. En [18] se resuelve el problema de asignar identificadores globales de manera secuencial a los nodos que forman parte de una estructura lineal para lo cual utiliza únicamente información del protocolo IEEE 802.15.4 sin la necesidad utilizar información y procesos de la capa de red, transporte y aplicación.

En base a que los nodos en una infraestructura lineal son fijos y que la topología lineal se mantiene a pesar del crecimiento de la red, los identificadores globales asignados de manera secuencial nos proporcionan información de la ubicación del nodo dentro de la infraestructura.

3.2. Conmutación de paquetes de almacenamiento y reenvío

Por su estructura lineal, un nodo tiene que reenviar el paquete en una sola dirección para alcanzar uno de los dos nodos frontera. En este caso el problema a resolver es determinar a cuál de los nodos que están dentro de su zona de cobertura se debe reenviar el paquete. Por otra parte, el nodo tiene únicamente una interface inalámbrica por la

cual recibe y retransmite el paquete, por consiguiente, el concepto de conmutación del paquete de una interface de entrada a una de salida no es aplicable.

Si los nodos previamente tienen un identificador asociado de manera secuencial, el nodo conoce con anterioridad cual es el nodo que está más alejado y al cual debe reenviar el paquete.

3.3. Servicios proporcionados a la capa de transporte

La capa de red entrega los paquetes a la capa de transporte, para lo cual se debe definir el tipo de servicio que la capa de red le debe ofrecer. Por lo general los servicios que ofrece la capa de red a la capa de transporte deben ser independientes de la tecnología del ruteador, en redes inalámbricas de sensores con topología lineal, todos los nodos que reenvían los paquetes son de la misma característica y utilizan la misma tecnología.

La capa de transporte debe funcionar independientemente de la cantidad, tipo de ruteadores, y de la topología de la red. Las direcciones de red disponibles para la capa de transporte deben usar un plan de direccionamiento uniforme, en el caso de las en redes inalámbricas de sensores con topología lineal, como ya se había mencionado, los identificadores del nodo sensor actúan como direcciones globales dentro de la red, lo cual cumple con este requerimiento.

Se debe considerar que, por lo general, la sesión que debe mantener el nodo fuente con el nodo frontera o con el Colector de Datos es única, por lo tanto, la utilización de puertos a nivel de transporte no es necesaria. Las redes inalámbricas son por naturaleza no confiables, por lo tanto, los nodos deben efectuar el control de errores (es decir, detección y corrección de errores), en el caso de las redes inalámbricas de sensores con topología lineal, que operan con IEEE 802.15.4, el protocolo permite realizar la detección de errores entre nodos contiguos y utilizar confirmaciones explícitas para confirmar la recepción exitosa del mensaje. En el caso de nodos no operativos y enlaces ruidosos o fallidos, el protocolo permite la retransmisión de mensajes entre los nodos. Esta característica puede eliminar la necesidad de una detección de errores de extremo a extremo realizada por la capa de transporte. El tamaño de los datos generados por la aplicación de sensado es pequeño, la información puede ser transmitida en el *payload* de una trama 802.15.4 que tiene una longitud de 127 byte con una capacidad máxima para datos de 119 byte, esto implica que no es necesario segmentar un paquete de red, por lo tanto, la tarea de identificar segmentos de un paquete de red para nuevamente reensamblarlos o reordenarlos no es necesaria.

3.4. Implementación del servicio con conexión y sin conexión

El nivel de red puede proporcionar servicios sin conexión, por lo que, los paquetes se transmiten por rutas diferentes en la red y se enrutan de manera independiente, sin embargo, en una topología lineal este concepto (datagramas) no es aplicable. Para utilizar el servicio orientado a conexión, es necesario una red de circuitos virtuales, lo cual es un limitante en topologías lineales, los circuitos virtuales establecen una ruta entre el nodo sensor y el nodo frontera antes de poder enviar cualquier paquete de datos. En una topología lineal, la ruta está definida por defecto y no es necesaria definirla previamente, sin embargo, se podría establecer una conexión virtual seleccionando los nodos de la topología lineal que serán utilizados para que el paquete llegue a su destino, esta opción, por el número limitado de nodos dentro de la zona de cobertura del nodo retransmisor se considera que es innecesaria.

Se debe tomar en cuenta que el nodo al tener la misma interface para transmitir o recibir los datos (mismo canal), la posible creación de circuitos virtuales no tendría sentido ya que se utilizaría el mismo canal físico para todos los circuitos virtuales. El momento que hay ruido en el canal de un nodo sensor inalámbrico, se caen todos los circuitos virtuales implementados.

Por otra parte, la creación de circuitos virtuales tiene como objetivo el proporcionar una calidad de servicio para la aplicación que utiliza el circuito virtual, en redes inalámbricas de sensores con topología lineal, todos los nodos ejecutan la misma aplicación y todos los datos que generan los nodos tienen la misma importancia.

Al existir un único canal que utilizan los nodos, las congestiones que se pueden producir en la red, no podrán ser evitadas por la creación de circuitos virtuales, la congestión de la red se puede evitar, mediante el control de los tiempos de monitoreo de los nodos y la periodicidad con la que envían los datos al nodo frontera.

3.5. Algoritmos de enrutamiento

La principal función de la capa de red es enrutar paquetes del nodo fuente al nodo destino, por lo que la utilización de algoritmos que eligen las rutas y las estructuras de datos son elementos importantes en el funcionamiento óptimo de la capa de red. El algoritmo de enrutamiento es el responsable de seleccionar la interface de salida del nodo por el cual se reenviará el paquete entrante. En el caso de una red inalámbrica de sensores con topología lineal, el nodo tiene una sola interface por la cual entrará y saldrá el paquete, lo que permite deducir que el protocolo de enrutamiento no requiere realizar la conmutación de interfaces y no es necesaria una tabla de enrutamiento.

El algoritmo de enrutamiento es el que adiciona rutas a la tabla de enrutamiento para que el nodo seleccione la interface de salida, la ejecución del algoritmo consume recursos de energía por el procesamiento del nodo para encontrar la ruta mas óptima y actualizar la tabla de enrutamiento, lo cual produce retardos por procesamiento en el nodo.

Esto nos conduce a la conclusión que en redes inalámbricas de sensores con topología lineal la utilización de algoritmos de enrutamiento diseñados para topologías árbol, estrella y malla, no es óptima, ya que la mayoría de funciones implementadas, estarían sobredimensionadas para este tipo de redes.

La capacidad para administrar una cola en el nodo es importante a nivel de red, ya que la existencia de muchos paquetes en la cola genera un tiempo de retardo. Los nodos sensores generan tráfico periódicamente a bajas velocidades, esta característica minimiza el riesgo de encolamiento en el nodo.

3.6. Algoritmos de congestión

La congestión se produce el momento que existen demasiados paquetes en el nodo o están ocupando un enlace, como consecuencia de la congestión se produce retardo, pérdida de paquetes y se degrada el desempeño de los enlaces y los nodos. Por lo general, las capas de red y de transporte comparten la responsabilidad de administrar la congestión. Como las congestiones ocurren dentro de la red, la capa de red es quien, en forma directa, toma decisiones relacionadas con la administración de los paquetes que no se pueden retransmitir de manera rápida. La manera más efectiva de controlar la congestión de paquetes en la red, es reducir la cantidad de paquetes que la capa de transporte envía por la red. Por lo cual, es necesario que las capas de red y de transporte trabajen en conjunto.

El tráfico resultante del monitoreo de infraestructuras lineales es periódico, al momento que ocurre un evento de monitoreo o alarma, la cantidad de datos que el nodo debe transmitir al nodo frontera es pequeña y el tamaño del *payload* del protocolo IEEE 802.15.4 cuyo tamaño máximo puede alcanzar 119 bytes puede resultar suficiente. El tráfico generado por los nodos que monitorean la red, se puede controlar mediante una administración adecuada los periodos de tiempo en que el nodo puede transmitir. Por otra parte, si el nodo genera alarmas, las alarmas se producen de manera esporádica y son generadas en un segmento de la infraestructura. El momento que los nodos contiguos transmiten datos generados por el mismo evento que genero la alarma se produce una mínima congestión.

3.7. Calidad de Servicio

Existen aplicaciones que se ejecutan en los nodos sensores que exigen de la red, un comportamiento más óptimo, mejor desempeño y que permitan a las aplicaciones dar los resultados que el cliente requiere. Por ejemplo, las aplicaciones multimedia condicionan a la red para que se les proporcionen una mínima velocidad de transferencia de datos y una latencia que no debe pasar de un valor máximo para operar satisfactoriamente. En las redes inalámbricas de sensores, no se transmite tráfico de voz y video, debido a que esta tecnología de comunicaciones no fue creada para transmitir ese tipo de aplicaciones, fue creada para transmitir datos de monitoreo a bajas velocidades. Por otra parte, en cada nodo sensor por lo general se ejecuta una sola aplicación para sensar eventos, y esa aplicación es ejecutada en todos los cientos de nodos de la infraestructura lineal por lo que todos los nodos tienen la misma importancia.

Puede existir el caso, de que los nodos monitoreen diferentes eventos y algún nodo necesite de un mejor servicio de la red para transmitir sus datos al nodo frontera sin embargo no es común. Es decir, no se puede hablar de varias aplicaciones que se ejecuten en los nodos y que requieran de la red diferente calidad de servicio.

3.8. *Tunelización*

Es en extremo difícil en una red inalámbrica de sensores con topología lineal, crear redes lógicas que hagan uso de la única ruta física especialmente por las limitaciones de cómputo de los nodos sensores.

3.9. *Fragmentación de paquetes*

La fragmentación de paquetes es necesario el momento en que cada capa de la arquitectura de red impone un tamaño máximo a sus paquetes, tramas o mensajes para su transmisión, estos límites en el tamaño máximo tienen relación con el protocolo que se utiliza en cada capa, el tipo sistema operativo que se utiliza en el nodo, el cumplimiento de algún estándar, con la reducción hasta cierto nivel del tiempo requerido para las retransmisiones realizadas debido a errores y minimizar los tiempos que el paquete ocupa el canal.

Las redes sensores inalámbricas utilizan a nivel de enlace el protocolo IEEE 802.15.4 que tiene una longitud de la trama de 127 bytes, se podría deducir que un paquete de red que se transmite encapsulado en este protocolo de enlace tiene que ser fragmentado. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que a nivel de aplicación de un nodo sensor, el mensaje que se va a transmitir por la red, no tiene longitudes de varios cientos o miles de bytes, es más, se podría asegurar que la longitud de un mensaje generado por un nodo sensor tiene una longitud menor que cien bytes, lo que implica que el paquete que manipula el nivel de red no tendrá la necesidad de ser fragmentado debido al tamaño máximo de la trama IEEE 802.15.4.

4. Propuesta

La optimización de los recursos de procesamiento y de energía es un reto fundamental en las redes inalámbricas de sensores con topología lineal, con el propósito de que esta tecnología sea utilizada en el desarrollo de aplicaciones que satisfagan los requerimientos actuales que utilizan este tipo de redes.

La propuesta de investigación consiste en eliminar el nivel de red en redes inalámbricas de sensores con topología lineal, ya que, una vez realizado el análisis indicado en la sección anterior, las funciones que debe realizar el nivel de red son mínimas. Además, se puede satisfacer las necesidades de calidad de servicio de las aplicaciones sin necesidad de tener el nivel de red. Esta aseveración la sustentamos con las siguientes hechos y premisas que validan el criterio de que las mínimas funciones que requiere el nivel de red en topologías lineales pueden ser incluidas en los demás niveles de la arquitectura de red.

Las razones para eliminar el nivel de red en las redes inalámbricas de sensores con topología lineal son:

- Los identificadores del nodo que forman parte del protocolo IEEE 802.15.4 pueden ser asignados automáticamente a los nodos, de manera secuencial (autoconfiguración de identificadores) [18].
- Los identificadores del nodo que forman parte del protocolo IEEE 802.15.4 pueden utilizarse como direcciones globales [18].
- Los identificadores asignados en forma secuencial en los nodos proporcionan información de la ubicación de los nodos en la infraestructura lineal con respecto a los nodos frontera debido a que están separados por distancias fijas.
- La utilización del protocolo IEEE 802.15.4 para confirmar la recepción exitosa de la trama utilizando una confirmación implícita en lugar de una confirmación explícita permiten minimizar el retardo y el consumo de energía en el nodo [19] y permite tener un sistema confiable [20].
- La recuperación de la red ante nodos caídos y enlaces fallidos puede ser realizada con el envío de la trama al siguiente nodo que está en la dirección del flujo de datos
- La confirmación de nodo a nodo que utiliza el protocolo IEEE 802.15.4 que se realiza a nivel de enlace es más eficiente que la confirmación de extremo a extremo [21] de la recepción exitosa de la trama
- Existe una sola ruta física en una topología lineal y cada nodo tiene una única interfase inalámbrica por lo que el proceso de enrutamiento y conmutación no es aplicable.

El protocolo Transporte de Telemetría de Cola de Mensajes para redes sensores (MQTT-SN) [22], es un protocolo de mensajería basado en el concepto de publicación/suscripción, diseñado para nodos que operan con baterías en

redes inalámbricas poco fiables con el propósito de extender la utilización del protocolo MQTT más allá del alcance de la infraestructura TCP/IP y de esta manera, permitir el desarrollo de aplicaciones que requieran de interconexión entre la WSN y la red Internet. La arquitectura de MQTT-SN fue desarrollada con el objetivo de ejecutarse a nivel de capa de aplicación por encima del estándar IEEE 802.15.4 que especifica las capas PHY y MAC.

El Protocolo de Aplicación Restringido (CoAP) [23] es un protocolo cliente-servidor que, a diferencia de MQTT, aún no está estandarizado y fue diseñado para ser usado en nodos con baja capacidad de cálculo, baja consumo de potencia y que necesitan transmitir tamaños de mensajes pequeños, como son los nodos de red inalámbricas de sensores.

Si bien el protocolo CoAP puede operar también en redes inalámbricas de sensores, las características del protocolo MQTT-SN diseñado específicamente para redes sensores inalámbricas le permiten trabajar de manera más óptima directamente sobre la capa de enlace, en [24] se mencionan algunas ventajas de la utilización de MQTT-SN en comparación de CoAP en redes inalámbricas de sensores por lo que tomando como base está característica, en la Tabla 1 se presenta una arquitectura de referencia para la red sensor inalámbrica con topología lineal.

Tabla 1. Arquitectura de red propuesta.

| Capa | Protocolo |
|----------------|--------------------|
| Aplicación | Aplicación usuario |
| Transporte | MQTT-SN |
| Físico, Enlace | IEEE 802.15.4 |

El proceso de la validación de la propuesta, requiere varias fases, la primera consiste en que los procesos requeridos para el enrutamiento sean realizados a nivel de enlace, en la actualidad se han realizado varias implementaciones básicas [19] [25] en las cuales se han implementado algunos de estos procesos para operar directamente con el nivel de enlace, una vez implementado y validado el funcionamiento óptimo de esos procesos, la segunda fase es la implementación del protocolo MQTT-SN sobre el protocolo 802.15.4. Para alcanzar estos objetivos se utiliza el nodo RCB256RFR2 [26] que permite acceder directamente al *payload* del protocolo IEEE 802.15.4 y realizar las adaptaciones pertinentes para proporcionarle al protocolo la capacidad de realizar las funciones requeridas del nivel de red, y además que facilita la implementación y validación del protocolo MQTT-SN sobre IEEE 802.15.4.

5. Conclusiones

El objetivo del artículo es discutir la pertinencia o no del nivel de red en las redes inalámbricas de sensores con topología lineal que por lo general son utilizadas para implementar sistemas de monitoreo, es por esa razón que se analiza la pertinencia de la existencia del nivel de red redes con topología lineal, el análisis se basa en las características de la red y lo que se requiere para que se realice un enrutamiento óptimo. Se analiza los servicios que ofrece el nivel de red y cuáles de estos servicios son necesarios en la red inalámbrica de sensores con topología lineal.

Es evidente que los protocolos de enrutamiento que se utilizan en la actualidad fueron diseñados para solucionar el problema de encontrar la mejor ruta en redes con topología estrella, malla y tipo árbol, lo que les convierte, en protocolos complejos y por lo tanto no óptimos para ser utilizados en topologías lineales. Se presenta la referencia en la cual el nivel de enlace asigna automáticamente identificadores globales a los nodos, identificadores que son necesarios para el funcionamiento del nivel de red, se explica la razón por la cual no es necesario clasificar el tráfico dentro de la red ya que todos los nodos generan el mismo tipo de mensaje y requieren la misma calidad de servicio. La fragmentación de paquetes, la calidad de servicio no es un requerimiento complejo, la tunelización es innecesaria, los procesos requeridos para realizar el enrutamiento son mínimos, por lo que se considera que no es necesario incluir el nivel de red en la arquitectura de una red inalámbrica de sensores con topología lineal. La optimización del retardo y el consumo de energía en los nodos, continúan siendo desafíos en los cuales se realiza investigación en la actualidad y que en el caso de las topologías lineales esta optimización puede obtenerse, minimizando los procesos que se deben realizar en el nodo con una arquitectura más simple. Se

considera solo una aplicación a ejecutarse en los nodos, y la confiabilidad de la red para una conexión de extremo a extremo se propone que la realice el nivel de enlace utilizando las confirmaciones implícitas.

En la actualidad persiste la necesidad de crear protocolos específicos y optimizar los existentes para satisfacer los sus requerimientos de redes con topología lineal, y de esta manera mejorar los retardos y minimizar el consumo de energía de los nodos. Crear una nueva arquitectura de red para redes inalámbricas de sensores con topología lineal que tenga conectividad con la arquitectura Internet es un reto y una tarea interesante.

6. Referencias

- [1] IEEE Computer Society. (2006). *Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*. IEEE Standard. Recuperado de: <http://profsite.um.ac.ir/~hyaghmae/ACN/WSNMAC1.pdf>
- [2] Varshney, S., Kumar, C., Swaroop, A., Khanna, A., Gupta, D., Rodrigues, J. J. P. C., Pinheiro, P. R., de Albuquerque, V. H. C. (2018). Energy efficient management of pipelines in buildings using linear wireless sensor networks. *Sensors*, 18 (8), 1-17. doi: <https://doi.org/10.3390/s18082618>
- [3] Ali, S., Ashraf, A., Qaisar, S. B., Kamran Afridi, M., Saeed, H., Rashid, S., Felemban, E. A., Sheikh, A. A. (2018). SimpliMote: A Wireless Sensor Network Monitoring Platform for Oil and Gas Pipelines. *IEEE Systems Journal*, 12 (1), 778-789. doi: <https://doi.org/10.1109/JSYST.2016.2597171>
- [4] Arjun, D., Indukala, P. K., Menon, K. A. U. (2018). Border surveillance and intruder detection using wireless sensor networks: A brief survey. Trabajo presentado en *International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*, Chennai, India. doi: <https://doi.org/10.1109/ICCSP.2017.8286552>
- [5] Vachan, B. R., Mishra, S. (2019). A user monitoring road traffic information collection using sumo and scheme for road surveillance with deep mind analytics and human behavior tracking. Trabajo presentado en *IEEE 4th International Conference on Cloud Computing and Big Data Analytics (ICCCBDA)*, Chengdu, China. doi: <https://doi.org/10.1109/ICCCBDA.2019.8725761>
- [6] Kadir, E. A., Rosa, S. L., Yulianti, A. (2019). Application of WSNs for Detection Land and Forest Fire in Riau Province Indonesia. Trabajo presentado en *International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS)*, Pangkal Pinang, Indonesia . doi: <https://doi.org/10.1109/ICECOS.2018.8605197>
- [7] Sazak, N., Ertug, M. (2017). The effect of node deployment scheme on LWSN lifetime for railway monitoring applications. Trabajo presentado en *IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS)*, Milan, Italia. doi: <https://doi.org/10.1109/EESMS.2017.8052692>
- [8] Raposo, D., Rodrigues, A., Sinche, S., Sá Silva, J., Boavida, F. (2018). Industrial IoT monitoring: Technologies and architecture proposal. *Sensors*, 18 (10), 1-32. doi: <https://doi.org/10.3390/s18103568>
- [9] Gratton, D. A. (2016). 12 - ZigBee: Untethered and Unlicensed. En D. A. Gratton (Ed.) *Developing Practical Wireless Applications* (pp. 166-180). Burlington: Digitla Press. doi: <https://doi.org/10.1016/b978-155558310-1/50015-x>
- [10] Chen, Y., Hou, K. M., Zhou, H., Shi, H. L., Liu, X., Diao, X., Ding, H., Li, J. J., De Vaulx, C. (2011). 6LoWPAN stacks: A survey. Trabajo presentado en *7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, Wuhan, China. doi: <https://doi.org/10.1109/wicom.2011.6040344>
- [11] Suhonen, J. (2012). *Designs for the Quality of Service Support in Low-Energy Wireless Sensor Network Protocols* (Tesis Doctorado). Tampere University of Technology. Recuperado de: <https://www.realin.fi/lib/docs/Jukka%20Suhonen%20PhD%20thesis.pdf>
- [12] Rani, S., Ahmed, S. H., Malhotra, J., Talwar, R. (2017). Energy efficient chain based routing protocol for underwater wireless sensor networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 92, 42-50. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.01.011>
- [13] Gupta, S. K., Kumar, S., Tyagi, S., Tanwar, S. (2020). Energy Efficient Routing Protocols for Wireless Sensor Network. En P. Singh, B. Bhargava, M. Paprzycki, N. Kaushal, WC. Hong (Eds.), *Handbook of Wireless Sensor Networks: Issues and Challenges in Current Scenario's. Advances in Intelligent Systems and Computing* (pp. 275-298). Cham: Springer. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-40305-8_14

- [14]Egas, C., Gil-Castiñeira, F. (2021). Revisión de requisitos, protocolos y desafíos en LWSN. *Maskay*, 11 (1), 13–21. <https://doi.org/10.24133/maskay.v11i1.1728>
- [15]Kumar S., A. A., Ovsthus, K., Kristensen., L. M. (2014). An industrial perspective on wireless sensor networks-a survey of requirements, protocols, and challenges. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 16 (3), 1391-1412. doi: <https://doi.org/10.1109/SURV.2014.012114.00058>
- [16]Karl, H., Willig, A. (2006). Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks. En H. Karl, A. Willig (Eds), *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks* (pp. 15-57). England: John Wiley & Sons Ltd. doi: <https://doi.org/10.1002/0470095121>
- [17]Vasseur, J.-P., Dunkels, A. (2010). Chapter 22 - Smart Cities and Urban Networks. En J.-P. Vasseur, A. Dunkels (Eds.), *Interconnecting Smart Objects with IP: The Next Internet* (pp. 335-351), Burlington: Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-375165-2.00022-3>
- [18]Egas, A. C., Gil-Castineira, F., Costa-Montenegro, E., Sa Silva, J. (2016). Automatic allocation of identifiers in linear wireless sensor networks using link-level processes. Trabajo presentado en *8th IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*, Medellín, Colombia. doi: <https://doi.org/10.1109/LATINCOM.2016.7811574>
- [19]Egas, C., Gil-Castiñeira, F., Espinosa Gualotuña, C. (2020). Optimization of delays and power consumption in large-scale linear networks using iACK. Trabajo presentado en *IEEE ANDESCON*, Quito, Ecuador. doi: <https://doi.org/10.1109/ANDESCON50619.2020.9272063>
- [20]Rosberg, Z., Liu, R. P., Dong, A. Y., Tuan, L. D., Jha, S. (2008). ARQ with implicit and explicit ACKs in wireless sensor networks. Trabajo presentado en *IEEE Global Telecommunications*, New Orleans, USA. doi: <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2008.ECP.18>
- [21]Mahmood, M. A., Seah, W. K. G., Welch, I. (2015). Reliability in wireless sensor networks: A survey and challenges ahead. *Computer Networks*, 79, 166-187. doi: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2014.12.016>
- [22]Fontes, F., Rocha, B., Mota, A., Pedreiras, P., Silva, V. (2020). Extending MQTT-SN with Real-Time Communication Services. Trabajo presentado en *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Vienna, Austria. doi: <https://doi.org/10.1109/ETFA46521.2020.9212147>
- [23]Iglesias-Urkia, M., Orive, A., Urbieta, A. (2017). Analysis of CoAP Implementations for Industrial Internet of Things: A Survey. *Procedia Computer Science*, 109, 188-195. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.323>
- [24]Martí, M., García-Rubio, C., Campo, C. (2019). Performance Evaluation of CoAP and MQTT-SN in an IoT Environment. *Proceedings*, 31 (1), 1-12. doi: <https://doi.org/10.3390/proceedings2019031049>
- [25]Díaz Guano, J. D., Mejía Mejía, M. F. (2019). *Implementación de un algoritmo para la detección de nodos caídos y fallos de enlace en topologías tipo árbol utilizando el estándar IEEE 802.15.4* (Tesis de grado). Escuela Politécnica Nacional. doi: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20267?mode=full>
- [26]ATMEL. (2013). *Atmel AVR10004: RCB256RFR2 – Hardware User Manual*. Recuperado de: https://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/Atmel-42081-RCB256RFR2-Hardware-User-Manual_Application-Note_AVR10004.pdf